第46卷　第6期
2023年6月
干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY
Vol. 46 No. 6
Jun. 2023

伊犁谷地地质灾害分布特征及主控因素分析

梁世川，乔　华，吕　东，贺　强
（新疆维吾尔自治区地质环境监测院，新疆 乌鲁木齐　830000）

摘　要： 伊犁谷地滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷等地质灾害频发，灾害形成的影响因素多样。基于伊犁谷地地质灾害数据库，利用频率比法、接受者操作特征曲线(Receiver operating characteristic curve，ROC)等统计分析方法，研究伊犁谷地地质灾害的分布特征，分析地质灾害发育的主控因素。结果表明：(1) 伊犁谷地地质灾害整体发育程度东部大于西部，集中在500~3500 m高程的中低山区。在时间上，主要集中在春夏融雪和降雨季节。(2) 地质灾害的发育受地层岩性、地质构造、地形地貌、降水等多因素影响，但不同类型地质灾害的主控因素不同，滑坡受地层岩性、高程、坡度、年降水量的影响最明显，崩塌主要为坡度、高程、距断层距离因素控制；地面塌陷明显受高程、距断层距离、降水量的影响，基本由地下采矿活动诱发；距断层距离和高程是泥石流发育的主控因素。

关 键 词： 地质灾害；分布特征；主控因素；频率比；ROC曲线；伊犁谷地
文章编号： 1000－6060(2023)06－0880－09(0880～0888)

伊犁谷地位于我国境内天山山脉的西段，地形地质条件复杂，属半干旱气候区，冬寒夏热，昼夜温差大，风化剥蚀作用强烈，地质环境脆弱[1-4]。同时，该区滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害十分发育，是新疆地质灾害多发区，频发的地质灾害不仅对生态环境造成巨大破坏，也严重威胁当地人民生命财产安全，制约地方社会经济可持续发展[5-9]。新源县S316蜂场—则克台路段13 km处在2002年发生特大型黄土滑坡，导致交通长期中断，对当地经济活动和人民生活造成严重影响[10-12]。巩留县莫乎尔乡2004年发生黄土滑坡灾害，造成8人失踪以及24×10^4元的直接经济损失[13]。G30果子沟段于2014年发生山体滑坡，阻断交通46 d[6]。研究地质灾害分布特征，厘定灾害发育的主控因素，对地质灾害评价和防灾减灾工作有重要意义。安海堂等[5]认为伊犁地区黄土滑坡的形成受黄土特性、降水与融雪、地震、植被、工程活动影响。曹小红等[8]基于现场调查，利用统计归纳方法，提出伊犁谷地滑坡发生的频次与降水量及次数之间存在正相关性，伊犁河谷南北两侧在1300~2000 m高程范围的中低山及低山丘陵区的滑坡最为集中。张鸿义等[14]通过研究新源县山区黄土滑坡，认为地貌条件和地质条件是滑坡形成的基础条件，大气降水是滑坡发生的主要诱发因素。现有的研究主要集中于黄土滑坡灾害，未形成伊犁谷地地质灾害类型主控因素的系统性认识。

本文基于多年现场灾害调查数据，利用频率比法等统计归纳方法，研究伊犁谷地崩塌、滑坡、泥石流及地面塌陷等地质灾害的分布特征，分析伊犁谷地崩塌、滑坡、泥石流及地面塌陷等地质灾害形成的主控因素，揭示地形地貌、地质构造、地层岩性、降水及人类工程活动对地质灾害的作用特点，为伊犁地区地质灾害评价和防灾减灾工作提供一定的参考，服务于“一带一路”倡议的实施。

1　研究区概况

伊犁谷地位于我国新疆天山山脉西段，北天

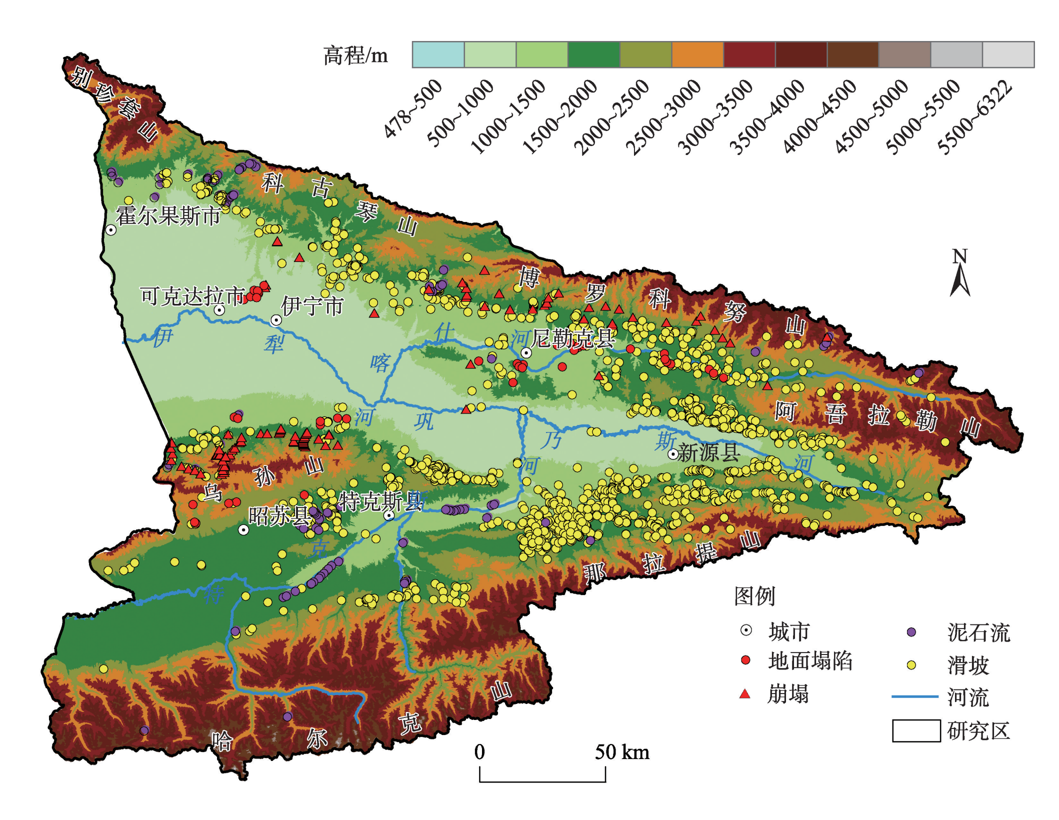
收稿日期： 2022-09-14；　**修订日期：** 2022-10-31
基金项目： 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0904)；新疆重大地质灾害监测预警与防治技术示范(2021B03004)资助
作者简介： 梁世川(1986-)，男，硕士研究生，高级工程师，主要从事水文地质、工程地质、环境地质、地质灾害等方面的研究.
E-mail: 522346375@qq.com

山、南天山支脉之间，呈“三山夹两谷地一盆地”地貌格局，地质条件较复杂。研究区70%以上为山地，整体地貌可分为侵蚀褶皱断块山、剥蚀堆积块状隆起山和堆积平原[8]。北部北天山NW-SE走向，南部南天山NEE-SWW走向，中部乌孙山、铁木里克山、阿吾拉勒山、伊什基里克山等横亘在伊犁谷地。北中南三列山系最终向东汇合形成依连哈比尔尕山山结，北部包括伊犁-巩乃斯谷地、喀什河谷地，南部为特克斯-昭苏盆地。伊犁谷地一级构造单元属天山褶皱系，包括博罗科努复背斜、伊犁地块、哈尔克山复背斜3个二级构造单元，主要断裂有：尼勒克断裂、尼勒克以东吉仁台隐伏断裂、巩乃斯河隐伏断裂、那拉提断裂、阿吾拉勒山西端断层、雅马渡断层、恰博河断裂、哈尔克山断裂、昭苏-特克斯断裂[15]。伊犁谷地地层岩性复杂，元古界—新生界大部分地层在研究区均有分布。第四系(下更新统—全新统)黄土分布广泛，主要在谷地南北两侧山麓地带，覆盖于山区基岩山坡，往往地质灾害多发；垂直方向上，上限至林带，下限与河谷平原相接，海拔高度在600~2200 m，厚度一般在30 m左右，局部最厚处可达80 m[16]。此外，远离海洋的伊犁谷地虽属大陆性半干旱气候区，但北、东、南三面高山环绕组成向西开口的喇叭形谷地，北冰洋和大西洋的潮湿气流可以直接地从谷地西口进入，区内常形成多雨雪的天气，降水比较丰沛，因而具有湿润大陆性中温带气候特征，年均降水量220~464 mm，部分山区可达600 mm[17]。在内外动力作用下，研究区的滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害十分发育(图1)。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究基于2020年新疆地质灾害数据库，结合现场调查及遥感解译(通过Google Earth遥感影像)，建立伊犁谷地地质灾害数据库(1985—2020年)，研究区包括地质灾害1795处。其中：滑坡灾害1548处、崩塌灾害109处、泥石流灾害88处、地面塌陷灾害50处；坡度、坡向及高程等地形地貌数据利用ASTER GDEM 30 m分辨率的数字高程数据(http://www.gscloud.cn/)提取生成；断层数据来源于国家地震活断层研究中心官网的断层数据集(https://www.



注：该图基于新疆维吾尔自治区地理信息公共服务平台下载的审图号为新S(2021)142号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1 伊犁谷地地质灾害与地形地貌分布

Fig. 1 Distributions of geohazards and topography in Ili Valley

eq-igl.ac.cn/gjdzhdcyjzx/index.html)；伊犁谷地多年平均降水量数据下载自WorldClim官网(https://www.worldclim.org/data/index.html)。

2.2 研究方法

2.2.1 频率比法 为研究地质构造、地形地貌、降水等因素对地质灾害的影响，利用ArcGIS软件的"以表格显示分区统计"等工具，将研究区的距断层距离、高程、坡度、坡向、降水量等信息归纳分析[18]。其中，将高程按500 m间隔，划分为12个等级；将距断层距离划分为0~100 m、100~200 m、200~400 m、400~800 m、800~1600 m、1600~3200 m、3200~6400 m、>6400 m 8个等级；将坡度按5°间隔，划分为18个等级；依据自然断点法，将坡向划分为N、NE、E、SE、S、SW、W、NW 8个类别；降水量以50 mm为间隔，划分为9个等级。基于以上地形地貌数据划分，利用"重分类"工具处理研究区高程、坡度、坡向数据，统计各数据类别的栅格面积及灾害数量，计算灾害影响因素的频率比(Frequency ratio，FR)(图2)，数据类别的FR越高，灾害越易在影响因素范围内发生[19]。

$$FR_i = (H_i/H)/(A_i/A) \tag{1}$$

式中：假定将某类型地质灾害的某一影响因子分为i类(如坡度因素划分为0~5°、5°~10°、…、i类)。H_i为研究区内该影响因素第i类的该类型灾害面积；A_i为研究区内该影响因素第i类的面积；H为研究区内该类型灾害的总面积；A为研究区总面积。本文H_i和H分别使用灾害数量和总数量。

2.2.2 ROC曲线 为深入分析地质灾害各影响因素的作用程度，采用接收者操作特征曲线(Receiver operating characteristic curve，ROC)评价不同影响因

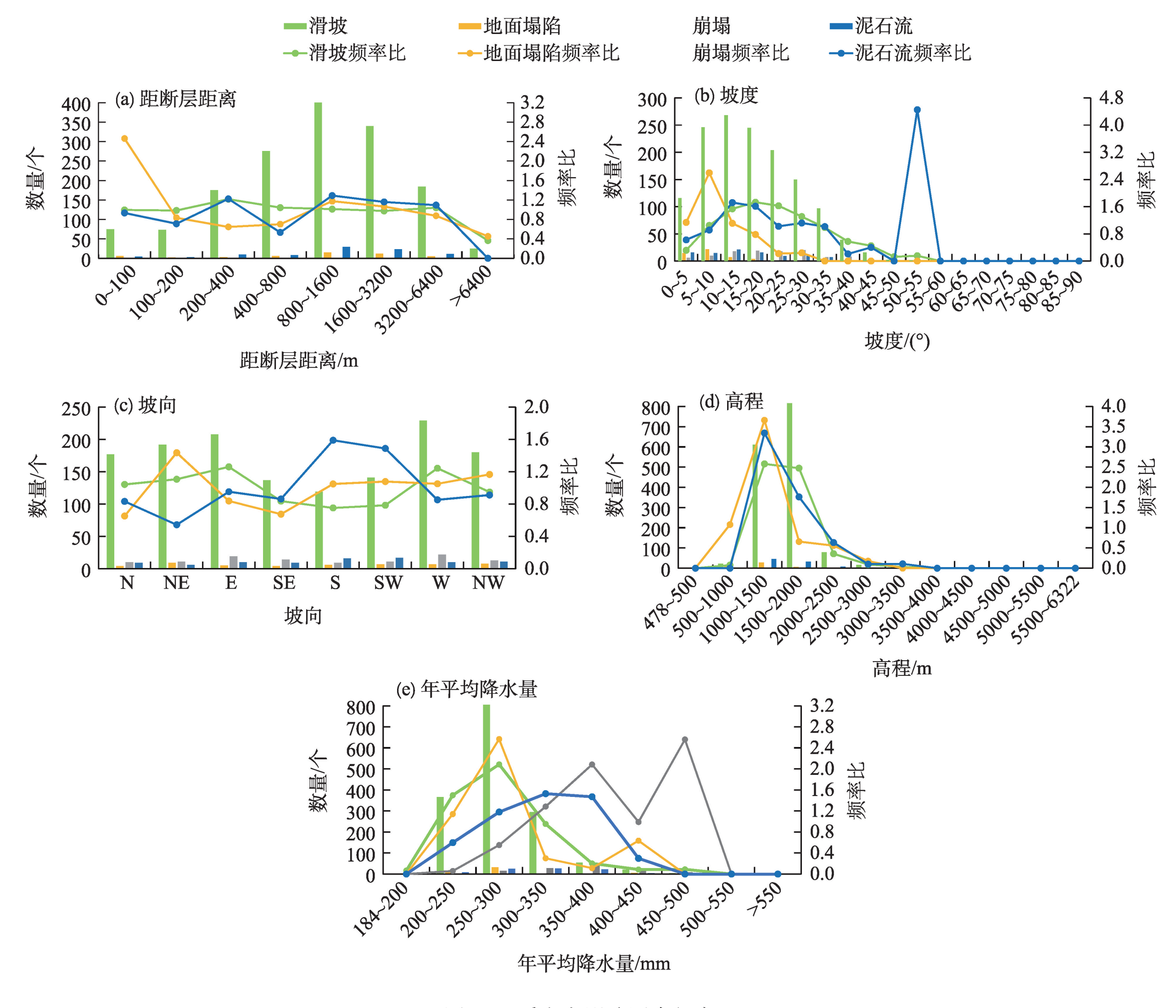


图2 地质灾害影响因素频率比

Fig. 2 Frequency ratios of geohazard influencing factors

素的作用大小[19-20]。在ROC曲线中，X轴为伪阳性率（FPR），Y轴为真阳性率（TPR）。

$$FPR = FP/(FP + TN) \quad (2)$$

$$TPR = TP/(TP + FN) \quad (3)$$

式中：FP为伪阳性，判断为有地质灾害，实际却没有地质灾害；TN为真阴性，判断为没有地质灾害，实际也没有地质灾害；TP为真阳性，为判断有地质灾害，实际也有地质灾害；FN为伪阴性，判断为没有地质灾害，实际却有地质灾害。把统计各影响因素下不同类别或级别的频率比值降序排列，由式（2）、（3）计算ROC曲线下面积（Area under the curve of ROC，AUC）值。研究区不同影响因素AUC值计算结果见表1，影响因素相应的AUC值越高，其对某地质灾害类型的作用越强。

表1 不同影响因素ROC影响下曲线面积（AUC）值计算结果

Tab. 1 AUC values of influencing factors

影响因素	滑坡	崩塌	泥石流	地面塌陷
距断层距离	0.626	0.691	0.848	0.693
坡度	0.750	0.832	0.468	0.379
坡向	0.524	0.503	0.525	0.520
高程	0.836	0.760	0.851	0.772
年平均降水量	0.718	0.580	0.552	0.729

3 结果与分析

3.1 地质灾害分布特征

3.1.1 空间分布特征 横向上看，伊犁谷地地质灾害整体发育程度东部大于西部（图1），尤其是那拉提山、阿吾拉勒山、博罗科努山之间的巩乃斯河谷和喀什河谷两侧的中低山区。滑坡、泥石流分布范围广，南北天山与伊犁河谷间的山地丘陵区都有分布；崩塌主要分布在乌孙山、喀什河谷及科古琴山南部；地面塌陷团簇状分布，基本在伊宁县西北部、尼勒克县东部及乌孙山南北两侧的低山丘陵区。伊犁谷地地质灾害在垂向空间上具有一定的分带规律，地质灾害整体集中在高程500~3500 m的中低山区。其中：在500~1000 m范围，主要发育滑坡、地面塌陷地质灾害；在1000~2500 m范围，主要发育崩塌、滑坡、泥石流地质灾害；在2500~3500 m及以上范围，崩塌、泥石流为主要地质灾害。即：高山区、中高山区以崩塌、泥石流地质灾害为主；中山区、中低山区主要分布崩塌、滑坡、泥石流地质灾害；西部低山丘陵及喀什河南岸低山区分布滑坡、地面塌陷地质灾害；河谷及平原区地质灾害不发育。

3.1.2 时间分布特征 时间上，伊犁谷地地质灾害主要集中在春夏融雪和降雨季节，特别是3—7月，为研究区地质灾害高发期。主要地质灾害中，滑坡灾害具有典型的成灾时间规律，且多数为新滑坡灾害。通过对研究区380处有记载发生月份的滑坡灾害进行统计分析，3—7月降雨和融雪季节为滑坡灾害发生集中时段，占统计数据的94.00%（图3）。

3.2 主控因素

3.2.1 地层岩性 伊犁谷地地质灾害大部分分布在黄土区，滑坡、地面塌陷、泥石流分别有79.95%、78.00%、55.68%为黄土区地质灾害。黄土是一个特殊的地质体，其形成年代晚，结构疏松多孔，垂直节理发育，且湿陷性强。相比于其他岩土体，黄土区域地质环境脆弱、地表破碎，更易发生黄土滑坡、泥

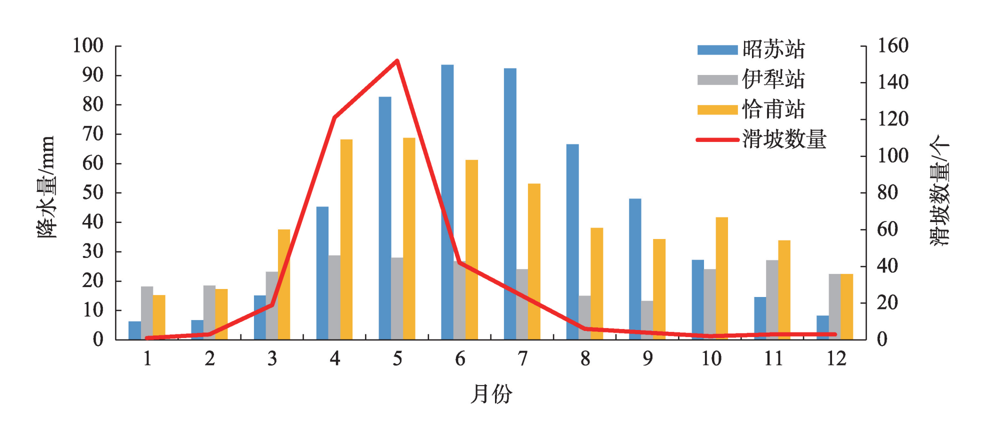


图3 伊犁谷地月平均降水量与滑坡月发生频次

Fig. 3 Monthly average precipitation and frequency of landslides in Ili Valley

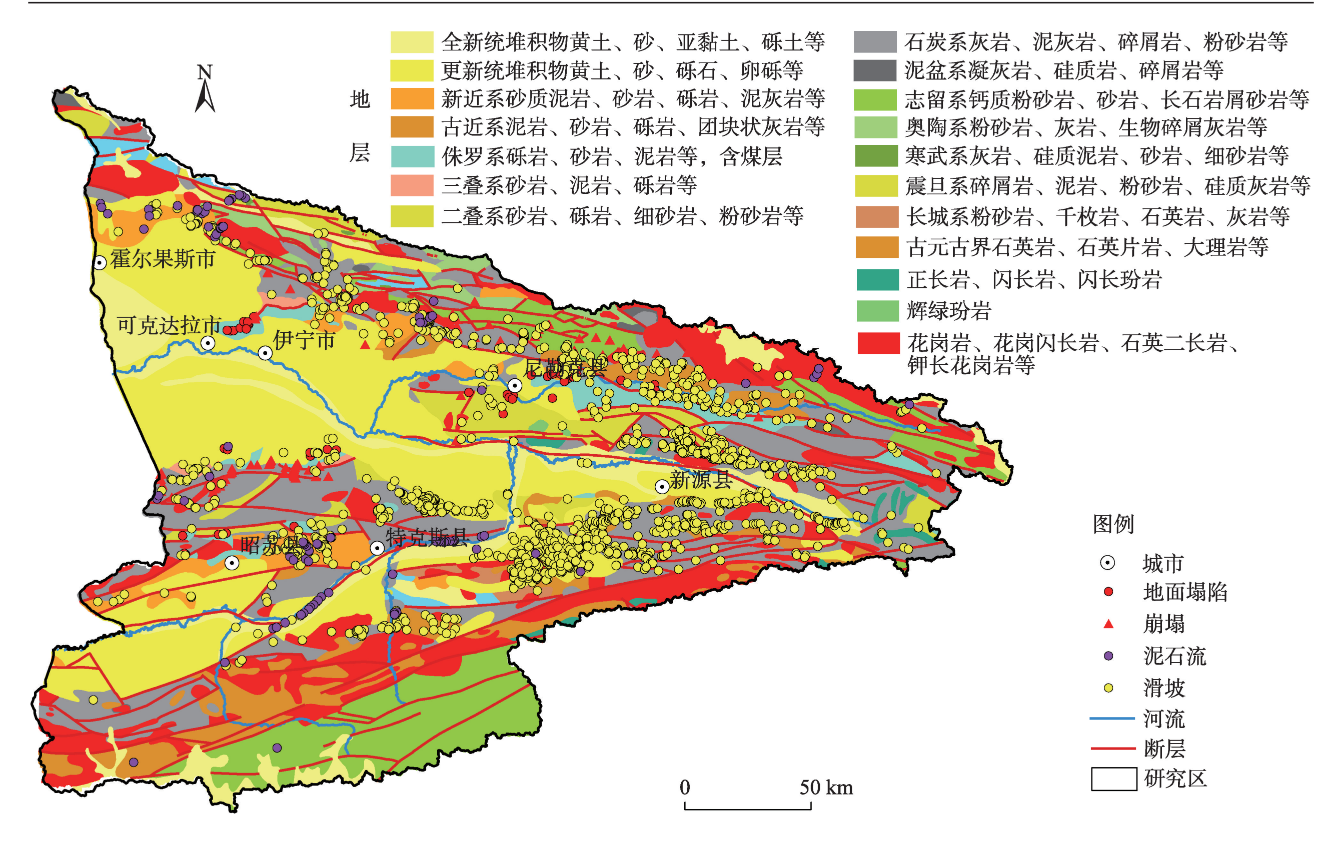


图4 伊犁谷地地质图

Fig. 4 Geology map of Ili Valley

石流等地质灾害[21]。伊犁谷地黄土呈带状分布于河流阶地、低山丘陵区、山麓斜坡(图4),多浅表高位沉积,厚度从数米到近百米不等[22]。黄土主要形成于末次间冰期,形成年代较晚,沉积过程中气候更为干冷,化学风化作用较弱,胶结程度低,是典型的风积黄土样本;与黄土高原的黄土相比,伊犁谷地黄土以粉砂为主,富Na_2O和CaO,粒径更粗,分选更差[23]。此外,伊犁谷地黄土存在大量格构孔隙,水敏性强,抗侵蚀能力低,自重湿陷性强,湿陷性修正系数计算值为1.64,大于我国其他地区[24]。伊犁谷地黄土的力学强度低,成为该区黄土滑坡、地面塌陷、泥石流多发的主要原因。

此外,新近系的砂质泥岩、薄层砂岩,古近系和侏罗系的砾岩、砂岩、泥岩,石炭系的碎屑岩、粉砂岩、泥灰岩等是滑坡、崩塌的易发岩层。由于低强度软弱夹层的存在,坡体整体性比一般边坡差,软弱夹层还会放大降雨、水库蓄水及工程开挖的动力响应,不利于坡体稳定性[25]。如塔西河组的砂质泥岩夹砂岩、独山子组的泥质砂岩夹砂岩及安集海组的灰绿色泥岩夹泥灰岩与薄层砂岩以及含煤地层,多为崩滑灾害的高易发地层。

3.2.2 地质构造 断层等地质构造附近常因动力作用,出露岩体破碎、整体性差的破碎带,发育地表起伏变化大的断层崖等构造地貌。断层面、节理面等结构面常成为控制崩滑灾害发育的边界,松散破碎的岩土体为滑坡、泥石流等灾害的发育提供物源条件,断层附近经常是崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害的易发区域。如图2a所示,崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害主要分布在距离断层3200 m以内,距离断层1600 m以内的区域是地质灾害的高易发区。其中,地面塌陷作为地下岩土体变形破坏产生的灾害,明显在距断层0~100 m范围最易发生。表1中,相比于其他地质灾害,泥石流的AUC值为0.848,受断层影响最大。乌孙山断裂、喀什河断裂等附近的松散岩土体为泥石流形成提供充足物质条件,断层裂谷等地势变化大的地貌是泥石流发生的有利地形[1];其次,地面塌陷和崩塌受断层作用的AUC值分别为0.693和0.691,高于滑坡的0.626。

3.2.3 地形地貌 影响地质灾害发育的地形地貌条件有坡度、坡向和高程。从表1可以看出,泥石流和地面塌陷关于坡度的AUC值分别为0.468、0.379,表明两者受坡度的影响不明显。而滑坡和崩塌的

AUC值分别为0.750和0.832，受坡度影响大，崩塌更易受坡度影响。滑坡主要分布在35°坡度范围以内，10°~35°坡度范围是滑坡灾害的高易发区（图2b）；崩塌高易发区的坡度范围集中分布在20°~50°坡度范围，坡度大于50°的区域因不足研究区面积的1%，未见明显崩塌灾害发育。地面塌陷表现为在0~20°坡度范围易发生，是因为地面塌陷发育地区基本为煤矿等地下开采区的复垦区，受当地采挖废弃土地复垦坡度要求限制，坡度一般不超过25°，故结果不能作为坡度影响地面塌陷发育的依据（图2b）。而对于坡向的影响，AUC值都比较低，各地质灾害的频率比值变化差异也不大，说明伊犁谷地崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害受坡向影响较小（图2c）。崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷等地质灾害分别集中分布在1000~3000 m、1000~2000 m、1000~3500 m、500~1500 m高程范围内（图2d）。此外，现场调查也发现，地面塌陷多在地表为黄土区的低山丘陵，基本为矿山井采诱发。高程因素下，滑坡和泥石流的AUC值，分别为0.836和0.851（表1），明显高于崩塌和地面塌陷的AUC值，各地质灾害类型关于高程的AUC值整体高于坡度和坡向。综上，地形地貌条件中，伊犁谷地地质灾害的主控因素为高程和坡度，坡向对地质灾害影响不明显。

3.2.4　降水量　由表1中年平均降水量下的AUC值可知，滑坡和地面塌陷的0.718和0.729，明显高于崩塌和泥石流的0.580和0.552，表明滑坡和地面塌陷受年平均降水量影响更强。滑坡和地面塌陷都集中分布在年平均降水量为200~350 mm的地区，中低山地貌多分布在该区，也是滑坡和地面塌陷的高易发区（图2e）。如图3所示，伊犁谷地月平均降水量与滑坡月发生频次存在紧密的相关性，滑坡发生的数量随月降水量的增加而增多。伊犁谷地的滑坡、地面塌陷灾害多为黄土区发生的地质灾害，黄土的水敏性强，遇水力学强度低，加上地面塌陷区多发育一定规模的裂缝，造成伊犁谷地的滑坡、地面塌陷灾害明显受降水量影响。

伊犁河谷的泥石流灾害基本分布在1000~3500 m高程范围，降雨及冰雪融水为主要水动力条件，春季的快速变暖会造成中、低山区的积雪大量融化[26]，降水量和气温变化都会影响泥石流的发育。此外，不同的降水类型对泥石流发生的作用也不相同，如暴雨更易触发泥石流。因此，单一的降水量数据与伊犁河谷泥石流分布的关系并不十分密切。

3.2.5　工程活动　伊犁谷地工程活动强烈，主要有水利工程、电力工程、矿业勘探开采、交通工程等。灾害数据集中统计的工程扰动灾害情况（表2），其中，绝大多数的地面塌陷及近半数的崩塌灾害为工程扰动诱发。

表2　伊犁谷地工程扰动灾害统计

Tab. 2　Statistics of engineering disturbance geohazards in Ili Valley

工程扰动方式	滑坡	崩塌	泥石流	地面塌陷
工程切坡	122	40	3	–
矿山地下开采	–	–	–	48
水库蓄水	33	14	–	–

注：工程切坡包括道路、矿山（含弃渣堆堆置）、电力等工程修建时的切坡行为。

通过现场调查发现，强烈的工程活动破坏地形地貌景观，改变了地应力原有平衡，加剧地质灾害发生。如山区道路路堑开挖对坡脚进行切坡，导致坡面岩土体处于临空状态、坡体基岩出露，造成坡体原始内应力失衡，诱发崩塌、滑坡、泥石流灾害（图5a~b）。水库蓄水一方面引起斜坡岩土体含水率增大，自重增加引起下滑力增大；另一方面导致蓄水位范围内的岩土体发生水岩化学作用，造成抗剪强度降低，从而引发滑坡（图5c）；山区矿山露天开采活动中开挖及爆破震动，也易引发崩塌、滑坡灾害。而采矿弃渣不合理堆放，为滑坡、泥石流提供了重要物源，产生灾害隐患；矿山地下开采形成了大量的采空区，易发生地面塌陷灾害（图5d）。

4　讨 论

伊犁谷地的崩塌、滑坡、泥石流和地面塌陷等地质灾害受地形地貌、地层岩性、地质构造、降水量等影响因素的限制，其分布在空间上和时间上表现出一定的规律性，但不同类型地质灾害的主控因素有所差异。如崩塌相比于其他地质灾害，受坡度影响最大，而地面塌陷则受坡度影响不明显，这与不同地质灾害类型的形成机理密切相关，地面塌陷由地下岩土体变形破坏引发，与地表坡度变化关系不大。因此，开展伊犁谷地的地质灾害评价工作时，应注意针对不同灾害类型，选择相关性强的影响因



图5　伊犁谷地典型工程扰动灾害

Fig. 5　Typical engineering disturbance geohazards in Ili Valley

素进行评价[6,19]。

地层岩性、人类工程活动等影响因素与地质灾害间作用关系复杂,不同影响因素之间也存在耦合作用关系,如降水量分布与高程,崩塌易发的中高山区的降水量多为300~500 mm,滑坡、地面塌陷易发的中低山区大部分降水量在200~350 mm之间。文中未能采用定量方法进行系统归纳分析,下一步工作中有待加强。此外,本文所用灾害数据集虽经过多次验证、完善,但伊犁谷地范围大,且部分区域甚至无法开展现场调查,难免存在遗漏之处。未来的地质灾害调查研究工作会不断深入,建立更加丰富的灾害数据库,用于伊犁谷地地质灾害的地质灾害评价和防灾减灾工作。

5　结　论

(1) 研究区滑坡、泥石流分布范围广,南北天山与伊犁河谷间的山地丘陵区都有分布;崩塌主要在乌孙山、喀什河谷及科古琴山南部;地面塌陷基本在伊宁县西北部、尼勒克县东部及乌孙山南北两侧的低山丘陵区。垂向上,西部低山丘陵及喀什河南岸低山区分布滑坡、地面塌陷灾害;中山区、中低山区主要分布崩塌、滑坡、泥石流灾害;高山区、中高山区以泥石流、崩塌灾害为主;时间上,滑坡、泥石流等地质灾害主要集中在春夏融雪和降雨季节,特别是3—7月。

(2) 地层岩性、断层、地形地貌等都影响伊犁谷地地质灾害的发育,但不同类型地质灾害的主控因素有所不同。滑坡、地面塌陷主要分布在黄土区,部分软弱夹层发育的地层也是崩滑灾害的易发区;滑坡受高程、坡度、降水量的影响更大,崩塌主要受坡度、高程、距断层距离因素控制;地面塌陷明显受高程和距断层距离的影响,也与降水量关系密切,且基本由地下采矿活动诱发;距断层距离和高程是泥石流的主控因素;而坡向对伊犁谷地地质灾害的影响不明显。

参考文献(References)

[1] 胡卫忠. 新疆的干旱环境与滑坡、泥石流及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 1994(3): 1-7. [Hu Weizhong. Arid environment, landslides and debris flow in Xinjiang and its preservation and controlling[J]. Geological Hazards and Environment Preserva-

tion, 1994(3): 1-7.]

[2] 陈亚宁, 李卫红. 新疆干旱区地质灾害区划与减灾对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1995(4): 75-80. [Chen Yaning, Li Weihong. Zoning of geological hazards and countermeasures for its reduction in Xinjiang arid region[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1995(4): 75-80.]

[3] 殷剑虹, 徐予洋. 伊犁河谷气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(6): 20-23. [Yin Jianhong, Xu Yuyang. Analysis of climate change characteristics in Yili Valley[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2007, 1(6): 20-23.]

[4] 尹光华, 王兰民, 袁中夏, 等. 新疆伊犁黄土的物性指标、动力学特性与滑坡[J]. 干旱区地理, 2009, 32(6): 899-905. [Yin Guanghua, Wang Lanmin, Yuan Zhongxia, et al. Physical index, dynamic property and landslide of Ili loess[J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6): 899-905.]

[5] 安海堂, 刘平. 新疆伊犁地区黄土滑坡成因及影响因素分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2010, 21(3): 22-25. [An Haitang, Liu Ping. Genesis and influencing factors of loess landslides in Yili region in Xinjiang[J]. Geological Hazards and Environment Preservation, 2010, 21(3): 22-25.]

[6] 赵良军, 李虎, 刘玉锋, 等. 新疆伊犁果子沟地质灾害风险评价及其致灾因子[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 693-700. [Zhao Liangjun, Li Hu, Liu Yufeng, et al. Evaluation on geological hazard risk and disaster-causing factors in the Guozigou Valley in Ili, Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(3): 693-700.]

[7] 毛伟, 如黑艳·木合买尔, 贺强. 新疆伊犁谷地滑坡地质灾害形成机制及防治措施[J]. 西部资源, 2018(3): 131-133. [Mao Wei, Muhemaier Ruheiyan, He Qiang. Formation mechanism and prevention measures of landslide geological hazards in Yili Valley, Xinjiang[J]. Journal of Western Resources, 2018(3): 131-133.]

[8] 曹小红, 孟和, 尚彦军, 等. 伊犁谷地黄土滑坡发育分布规律及成因[J]. 新疆地质, 2020, 38(3): 405-411. [Cao Xiaohong, Meng He, Shang Yanjun, et al. The development and distribution of loess landslides in Yili Valley and its causes[J]. Xinjiang Geology, 2020, 38(3): 405-411.]

[9] 张林梵, 王佳运, 张茂省, 等. 基于BP神经网络的区域滑坡易发性评价[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 260-270. [Zhang Linfan, Wang Jiayun, Zhang Maoxing, et al. Evaluation of regional landslide susceptibility assessment based on BP neural network[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 260-270.]

[10] 乔国文. 新疆伊犁地区黄土性质及边坡稳定性分析与防治——以省道316线加朗普特滑坡为例[J]. 西南公路, 2016(3): 163-167. [Qiao Guowen. Analysis of loess properties and slope stability in Yili area, Xinjiang: A case study of Jialangpute landslide on provincial highway 316[J]. Southwest Road, 2016(3): 163-167.]

[11] 刘丽楠, 李守定, 姜越, 等. 新疆伊犁加朗普特黄土滑坡泥石流降雨诱发机理[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5): 1230-1237. [Liu Linan, Li Shouding, Jiang Yue, et al. Failure mechanism of loess landslides due to saturated-unsaturated seepage: Case study of Gallente landslide in Yili, Xinjiang[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(5): 1230-1237.]

[12] 曹小红, 尚彦军, 弓小平, 等. 新源县加朗普特滑坡发育特征、形成机理及治理[J]. 新疆地质, 2019, 37(4): 560-565. [Cao Xiaohong, Shang Yanjun, Gong Xiaoping, et al. Development characteristics, formation mechanism and protection of Jialangpute landslide in Xinyuan County[J]. Xinjiang Geology, 2019, 37(4): 560-565.]

[13] 刘毅. 伊犁黄土滑坡特征、成因及稳定性分析[D]. 石河子: 石河子大学, 2015. [Liu Yi. Analysis of geological features, cause and stability of the loess landslide in Ili[D]. Shihezi: Shihezi University, 2015.]

[14] 张鸿义, 黄洪标, 闫中学. 新疆新源山区黄土滑坡形成条件与防治措施[J]. 新疆地质, 2004, 22(3): 233-237. [Zhang Hongyi, Huang Hongbiao, Yan Zhongxue. Forming conditions and proven-tion treatment of loess landlide in the Xinyuan mountain area, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2004, 22(3): 233-237.]

[15] 李艳永, 王成虎, 朱皓清, 等. 北天山地区震源机制与构造应力场特征[J]. 地震, 2020, 40(2): 117-129. [Li Yanyong, Wang Chenghu, Zhu Haoqing, et al. The focal mechanism and stress field inversion in northern Tianshan Mountain[J]. Earthquake, 2020, 40(2): 117-129.]

[16] 叶玮. 新疆伊犁地区自然环境特点与黄土形成条件[J]. 干旱区地理, 1999, 22(3): 9-16. [Ye Wei. Characteristics of physical environment and conditions of loess formation in Yili area, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 1999, 22(3): 9-16.]

[17] 何辉, 玉素甫江·如素力. 2001—2015年伊犁地区植被NDVI变化及其影响因子的相对作用分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 76-87. [He Hui, Rusuli Yusufujiang. Analysis of the relative role of vegetation cover changes and its influencing factors in Yili area from 2001 to 2015[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(10): 76-87.]

[18] 王瑞琪, 王学良, 刘海洋, 等. 基于精细DEM的崩塌滑坡灾害识别及主控因素分析——以雅鲁藏布江缝合带加查—朗县段为例[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5): 1146-1152. [Wang Ruiqi, Wang Xueliang, Liu Haiyang, et al. Identification and main controlling factor analysis of collapse and landslide based on fine DEM: Taking Jiacha-Langxian section of Yarlung Zangbo suture zone as an example[J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(5): 1146-1152.]

[19] 李郎平, 兰恒星, 郭长宝, 等. 基于改进频率比法的川藏铁路沿线及邻区地质灾害易发性分区评价[J]. 现代地质, 2017, 31(5): 911-929. [Li Langping, Lan Hengxing, Guo Changbao, et al. Geohazard susceptibility assessment along the Sichuan-Tibet railway and its adjacent area using an improved frequency ratio method[J]. Geoscience, 2017, 31(5): 911-929.]

[20] 赵良军, 陈冬花, 李虎, 等. 基于二元逻辑回归模型的新疆果子沟滑坡风险区划[J]. 山地学报, 2017, 35(2): 203-211. [Zhao Liangjun, Chen Donghua, Li Hu, et al. A method to assess landslide susceptibility by using logistic regression model for Guozigou re-

gion, Xinjiang[J]. Mountain Research, 2017, 35(2): 203-211.]

[21] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691. [Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(4): 684-691.]

[22] 叶玮, 桑长青, 赵兴有. 新疆黄土分布规律及粉尘来源[J]. 中国沙漠, 2003, 23(5): 38-44. [Ye Wei, Sang Changqing, Zhao Xingyou. Spatial-temporal distribution of loess and source of dust in Xinjiang[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(5): 38-44.]

[23] 宋友桂, 史正涛. 伊犁盆地黄土分布与组成特征[J]. 地理科学, 2010, 30(2): 267-272. [Song Yougui, Shi Zhengtao. Distribution and compositions of loess sediments in Yili Basin, Central Asia[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(2): 267-272.]

[24] An P, Zhang A, Xing Y, et al. Experimental study on settling characteristics of thick self-weight collapsible loess in Xinjiang Ili region in China using field immersion test[J]. Soils and Foundations, 2018, 58(6): 1476-1491.

[25] 张家明. 含软弱夹层岩质边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 工程地质学报, 2020, 28(3): 626-638. [Zhang Jiaming. State of art and trends of rock slope stability with soft interlayer[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 626-638.]

[26] 古力米热·哈那提, 张音, 苏里坦, 等. 季节性冻土水热对融雪及气温的响应[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 889-896. [Hanati Gulimire, Zhang Yin, Su Litan, et al. Response of water and heat of seasonal frozen soil to snow melting and air temperature[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 889-896.]

Distribution characteristics and main controlling factors of geohazards in Ili Valley

LIANG Shichuan, QIAO Hua, LYU Dong, HE Qiang

(Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Geological Environment Monitoring, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: Geohazards such as landslides, rock fall, debris flow, and ground collapse occur frequently in the Ili Valley, Xinjiang, China, and there are various influencing factors for the formation of these geohazards. Based on the database of geohazards in the Ili Valley, this paper uses statistical analysis methods such as the frequency ratio and receiver operating characteristic curve to study the distribution characteristics and main controlling factors of geohazards in the Ili Valley. The results show the following: (1) The overall development degree of geohazards in the Ili Valley is greater in the east than in the west, and they are distributed in the middle and low mountains with 500-3500-m elevation. In terms of time of occurrence, they are mainly clustered in the spring and summer snowmelt and rainfall seasons. (2) The development of geohazards is affected by stratigraphic lithology, geological structure, topography and geomorphology, precipitation, and other factors. However, the main controlling factors for different types of geohazards are different. Landslides are most obviously affected by stratigraphic lithology, elevation, slope, and annual precipitation, while rock falls are mainly controlled by slope, elevation, and distance from faults. Ground collapses are obviously affected by elevation, distance from fault, and precipitation, and are basically induced by underground mining activities. The distance and elevation from faults are the main controlling factors for the development of debris flows.

Key words: geohazards; distribution characteristics; main controlling factors; frequency ratio; receiver operating characteristic curve; Ili Valley